

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17800

研究課題名(和文)半極性面InGaNを用いた長波長発光素子の作製

研究課題名(英文)Fabrication of long-wavelength light-emitting devices using semipolar InGaN

研究代表者

久志本 真希 (Kushimoto, Maki)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：50779551

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Si基板上に成長させた半極性Ga_{0.5}In_{0.5}N結晶を用いて、黄色および赤色発光素子の発光効率の向上を検討した。

(1-101)InGa_{0.5}N結晶は、従来の(0001)InGa_{0.5}N結晶に比べてIn取り込み効率が高いため、より高温での成長が可能である。また従来の(0001)InGa_{0.5}Nと異なる緩和機構を有しており、In含有量が増加時に発生する欠陥を抑制することができる。更に活性層の下にInGa_{0.5}N層を挿入することで、TMIの供給や温度などの成長条件を変えることなく、InGa_{0.5}N層の厚さに応じてInGa_{0.5}N層の緩和率を制御することで、発光波長を容易に制御できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法はSi基板上に選択成長した半極性面Ga_{0.5}In_{0.5}N結晶特有の技術で、長波長の発光層の発光強度の向上が可能である。また成長基板として安価なSi基板を用いることや、選択成長を行うことから面内で発光波長が制御可能という特長を有する。これは近年研究が推進されているマイクロLEDディスプレイへの応用が期待される多色発光が可能なLED作製技術であり、Ga_{0.5}In_{0.5}N系LDの長波長化の実現につながる成長技術である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have investigated the improvement of the luminescence efficiency of yellow and red light-emitting devices by using semipolar Ga_{0.5}In_{0.5}N crystals grown on Si substrates.

The (1-101) InGa_{0.5}N crystals used in this study can be grown at higher temperatures due to their higher In uptake efficiency than that of the conventional (0001) InGa_{0.5}N crystals. In addition, (1-101)InGa_{0.5}N has a different relaxation mechanism than (0001)InGa_{0.5}N, which suppresses the defects that occur when the In content increases. By inserting an InGa_{0.5}N layer under the active layer, it was shown that the emission wavelength could be easily controlled by controlling the relaxation rate of the InGa_{0.5}N layer depending on the InGa_{0.5}N layer thickness rather than on the growth conditions such as TMI supply and temperature. These results indicate that the crystal quality is improved and the emission efficiency is increased.

研究分野：発光デバイス

キーワード：発光デバイス InGa_{0.5}N 半極性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

GaN、InN、AlN を代表とする窒化物半導体は、混晶制御によりエネルギーバンドギャップを 0.7eV~6.3eV と変化させることで可視光全領域の発光が可能である。そのための赤・青・緑色の全てを窒化物半導体で同一チップ上に作製すれば小型 RGB 光源となり、携帯型ディスプレイなどに応用可能である。特に窒化物半導体を用いた赤色発光素子は、従来の赤色発光素子に比べ温度による動作の変化が少なく、車載用など高温環境での駆動に最適である。そのため様々な発光波長の窒化物半導体素子を用いた多重波長可視光通信により、様々な環境で高速かつ大容量の通信が可能となると考えられる。

しかし従来用いられている結晶面方位(0001)面 GaN 上に製膜した InGaN を用いた黄色～赤色 LED は、発光効率が非常に低いことがわかっている。これは大きく 2 つの問題があり、長波長発光可能な高 In 組成 InGaN は低温成長が必要であることと、In 組成の増大に伴い下地 GaN との格子不整合が増大することである。前者においては In ドロプレットの形成ならびに、成長中に発生する成長表面の In 偏析により、高品質な結晶の作製が困難である。後者においては格子不整合が増加することで発光層に作用する分極電界が増加し、発光再結合確率が低下する。また格子不整合による歪を開放するため、V ピットやトレンチディフェクトが多数形成し、非輻射再結合中心として振る舞うことで発光効率の低下が発生すると考えられる。これらの問題を解決するため本研究では Si(001) 基板上に作製した半極性(1-101)面 GaN ストライプ結晶に着目した。

2. 研究の目的

従来から用いられている(0001)GaN とは異なる結晶面上に作製した InGaN を用いて、黄色～赤色で発光する発光デバイスの作製を目指す。本研究で用いる(1-101)InGaN では高成長レート成長により高温成長が可能で、結晶品質の改善が期待できる。また従来の(0001)InGaN と異なる緩和機構を持つため、In 組成増加に伴う緩和による欠陥形成の抑制と、発光効率の上昇が期待できる。これらを生かし、発光効率の高い長波長発光デバイスの作製と、本手法で作製した InGaN 発光デバイス構造の発光特性や電気特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 緩和により結晶面が傾いた InGaN(チルト)層上に InGaN 量子井戸構造の作製

InGaN チルト層を有する発光層構造の最適化を目指し、In 組成や膜厚の異なる InGaN チルト層を作製する。ただし成長条件により発光強度の低下の要因となる異常成長が発生することから、TMI 流量や NH₃ 流量など成長条件を変化し、異常成長の発生原因を明らかとする。成長した InGaN チルト層は X 線解析によるチルト緩和角度やチルト以外の緩和の発生の有無の評価を行う。加えて STEM-EDX や PL 測定を用いた In 組成の評価によりチルトによる緩和過程や In 取り込みの相関を明らかにし、今後の InGaN チルト層の設計指針とする。また様々な膜厚や In 組成の InGaN 層上に InGaN 発光層を成長し、光学特性評価を行うことで、InGaN チルト層構造による InGaN 発光層の発光波長の相関を検討する。

(2) 下地 GaN 結晶形状制御による長波長化

発光層形成前の結晶形状を成長条件により制御した結晶を用いて成長エッジに長波長の InGaN 発光層の作製を試みる。本実験では通常の(1-101)面で形成された結晶構造と比較して、成長エッジに c 面や(1-102)などの高指数の結晶面を持つ結晶上に発光層を作製する。本手法では強励起端面 PL により評価を行うため発光層は AlGaIn クラッド層、GaN ガイド層に挟まれた構造で作製する。この構造を窒素レーザーにより励起し、PL スペクトル観察や近視野像などの光学特性評価を実施する。

4. 研究成果

(1) 緩和により結晶面が傾いた InGaN(チルト)層上に InGaN 量子井戸構造の作製

InGaN チルト層の成長時の TMI 供給量について検討を行った。図 1 に示すように TMI 供給量を増加すると InGaN の組成は増加する。しかし三角錐上のヒロックが TMI 供給量を上げるほど大きく成長し、PL の発光強度が低下した。これは過剰な In 供給によりできた In ドロプレットが原因と考えられる。このことから TMI 供給量による In 組成の高組成化に限りがある。そこでチルト InGaN 層の膜厚に着目し、同一成長条件下で、InGaN 層の成長時間の異なる InGaN チルト層を成長した。その結果、図 2 に示すように同一の成

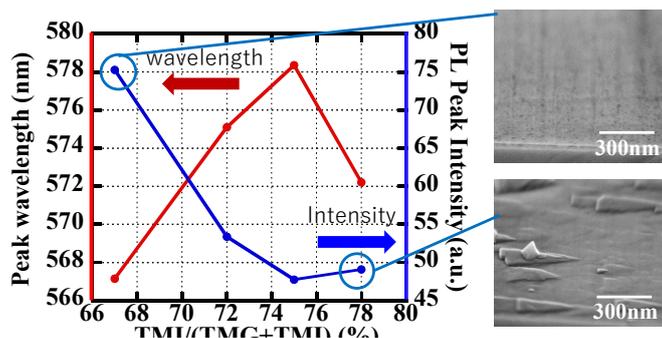


図 1 InGaN 層の PL 発光波長と発光強度の TMI 供給量依存

長条件で InGa_N 層が PL 発光波長が長波長化した。XRD による解析によって InGa_N 層の Ga_N 層に対するチルト角度が厚膜化するほど大きくなることがわかった。これはチルトによる緩和が進行することで In 組成が高くなったと考えられる。このように InGa_N 層の膜厚 による組成制御や緩和率制御が可能であることが分かった。

次に InGa_N チルト層が InGa_N 発光層に与える影響を検討するため、チルト層上に InGa_N MQW 層を形成した。比較のためチルト層を含まない Ga_N 層上に同一成長条件で InGa_N MQW 層の成長を行った。図 3 にそれぞれの PL スペクトルを示す。これらと比較するとチルト層を有さない InGa_N MQW 層に比べ、チルト層を挿入した InGa_N MQW 層の発光波長が長波長化し、発光強度の増加が見られた。さらなる長波長化のために InGa_N チルト層を厚くすると長波長化が観測された。しかしチルト層を厚くしすぎると発光強度は減少傾向となった。これはチルト層の結晶品質が厚くなることで低下し、発光層の結晶品質が下がったためと考えられる。

またチルト層を用いた InGa_N 発光層の詳細を検討するため結晶構造の解析を行った。本半極性 Ga_N 結晶上に InGa_N 層を積層した場合、TEM 像観察により InGa_N/Ga_N 界面にミスフィット転位が成長面内に発生し、InGa_N チルト層および発光層に積層欠陥を形成することを明らかとした。STEM による EDX 解析を行った結果、この積層欠陥部分では In 組成が選択的に減少していた。このように従来の結晶面では積層方向に転位が進展していたが、本結晶では積層面内のミスフィット転位および積層欠陥による緩和過程を明らかとした。また積層欠陥に Ga が偏析していたことから、積層欠陥周辺の Ga 組成が上昇することで積層欠陥エネルギーポテンシャルが高くなっており、発光強度の低減を抑制することが示唆された。

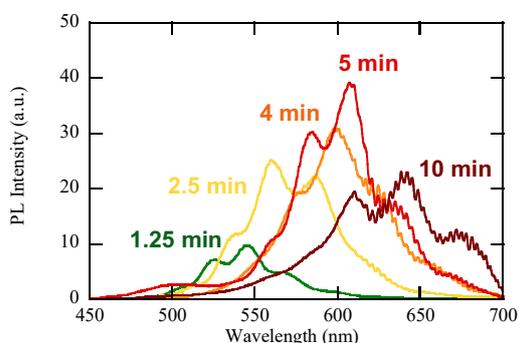


図 2 異なる成長時間の InGa_N 層の PL スペクトル

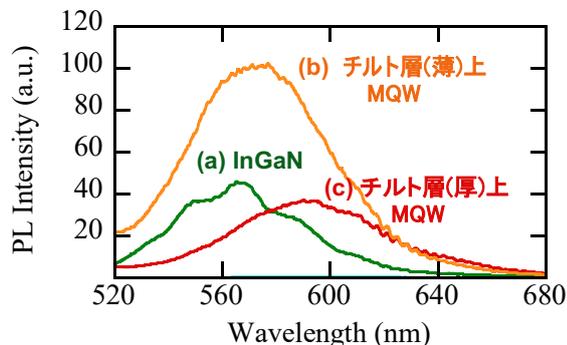


図 3 Ga_N 層および InGa_N チルト層上に作製した InGa_N 発光層のスペクトル

(2) 下地 Ga_N 結晶形状制御による長波長化

上記に加えて同じ結晶面を用いた長波長化の手法について検討した。従来本結晶は成長方向を c 軸とし(1-101)を表面および成長軸に対して対称な面として成長している。発光層直前に成長エッジの形状を制御し、長波長の InGa_N 発光層を形成した。本報告書で示す構造では窒素雰囲気中 Ga_N を成長することで成長エッジ領域に高指数面である(1-102)のような傾きを持つ面を形成した。これは表面および成長軸である c 軸に対称な面の両方で形成されることが BSE 像より観測された。図 4 に光共振器構造の端面発光像を示す。いずれも強励起により誘導放出を示した状態である。従来の構造では結晶全体が同じ発光波長で誘導放出していることがわかる。一方本手法で作製した共振器構造では成長エッジ領域に長波長の発光が観測されている。この手法では選択成長で見られる表面の In 拡散により、成長エッジ付近の In 組成が高くなり発光層が長波長化した。加えて体積が小さいため、光閉じ込めが高くなることや結晶欠陥を低減されていることが示唆される。実際にほかの領域に比べ端面からの PL 発光強度が高い。

以上のように Si 基板上に選択成長した半極性面 Ga_N 結晶に本手法を用いることで長波長化および発光強度の向上が可能となった。これらの手法は Si 基板上に選択成長した半極性面 Ga_N 結晶特有の技術である。これに加え成長基板として安価な Si 基板を用いることや、選択成長を行うことから面内で発光波長が制御可能という特長を有する。よって近年研究が推進されているマイクロ LED ディスプレイへの応用が期待される多色発光が可能な LED 作製技術であり、Ga_N 系 LD の長波長化の実現につながる成長技術である。



図 4 結晶構造の断面 SEM 像および強励起端面 PL 時の近視野像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Maki Kushimoto, Takafumi Suzuki, Daiki Ito, Yoshio Honda, and Hiroshi Amano
2. 発表標題 Semipolar InGaN Optical Devices on Patterned Si Substrates
3. 学会等名 ISSLED 2017（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久志本 真希、宇佐美 茂佳、出来真斗、本田 善央、天野 浩
2. 発表標題 異なる InGaN 膜厚の (1-101)GaN 基板上太陽電池の作製
3. 学会等名 第9回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----